

doi: 10.7690/bgzdh.2020.05.016

类椭圆截面战斗部侵彻混凝土弹道特性研究

王 皓, 高旭东

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为研究类椭圆截面战斗部对混凝土靶板的侵彻问题, 获得具有更好的侵彻特性的类椭圆截面战斗部, 对类椭圆截面战斗部侵彻混凝土弹道特性进行研究。定义类椭圆截面战斗部的截面特征参数, 利用 LS-DYNA 软件对不同特征参数下的类椭圆截面战斗部建立有限元模型, 仿真侵彻过程, 并通过 young 公式确定数值仿真结果。结果表明: 弹丸在侵彻过程中的纵向偏移量随截面特征系数的增大而减小, 弹丸总侵彻深度与截面特征系数反向变动。

关键词: 类椭圆; 截面特征; 侵彻; 混凝土

中图分类号: TJ012 **文献标志码:** A

Study on Ballistic Characteristics of Concrete Penetrating into Elliptical Section Warhead

Wang Hao, Gao Xudong

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to study the penetration of the elliptical section warhead on the concrete target, an elliptical section warhead with better penetration characteristics was obtained, and the ballistic characteristics of the concrete-like elliptical warhead were studied. The section characteristic parameters of the elliptical section warhead are defined. The finite element model of the elliptical section warhead under different characteristic parameters is established by LS-DYNA software. The penetration process is simulated and the numerical simulation results are determined by the young formula. The results show that the longitudinal offset of the projectile during the penetration process decreases with the increase of the section characteristic coefficient, and the total penetration depth of the projectile and the section characteristic coefficient change inversely.

Keywords: ellipse; section feature; penetration; concrete

0 引言

为满足快速响应以及远程打击的需要, 高速远程打击飞行器、电磁炮等新概念打击方案应运而生, 尤其是高速远程打击飞行器, 具有有效射程远、响应迅速等优点。典型远程打击部若搭载传统圆形截面战斗部, 将在飞行器中留有较大的剩余空间, 减少装药量从而不能达到打击并毁伤目标的战斗目标, 丧失最有利摧毁敌方的机会。

近年来, 我国学者也开始关注异型截面战斗部在侵彻过程中的问题。杜忠华等^[1]、高光发等^[2-3]对圆形、矩形和三角形截面的钨合金穿甲弹侵彻 4340 钢靶进行实验研究和模型分析。杜忠华团队对不同初速度下, 弹丸截面为圆形、矩形和三角形的长杆侵彻金属靶板的实验, 得到在矩形和三角形外接圆的半径相同, 且等于实验的圆形截面弹丸的半径时, 截面为圆形、矩形和三角形的长杆侵彻深度的大小排序为: 三角形、矩形和圆形。三角形截面

弹丸的侵彻深度大于矩形和圆形截面的弹丸这一现象, 由高光发团队通过数值模拟得到原因, 并且发现了三角形截面长杆在侵彻过程中的自锐作用。荣光等^[4-5]对 2 种非圆截面弹芯的斜侵彻过程开展数值模拟分析, 研究不同入射角下的弹体侵彻性能和跳飞现象。上述研究均为侵彻钢板。近期, 王文杰等^[6-7]开展了椭圆截面弹体侵彻砂浆混凝土靶实验, 并且建立基于空腔膨胀理论的受力模型。由此可见, 在侵彻混凝土方面, 异型截面战斗部处于发展阶段。

为推进异型截面战斗部侵彻混凝土的研究, 获得具有较好侵彻特性的异型截面形状, 笔者对类椭圆截面战斗部设定截面特征参数, 并对侵彻 40 MPa 素混凝土进行数值仿真和理论计算, 从而得到截面特征参数对于异型截面战斗部侵彻深度的影响。

1 研究目的

如图 1 所示, 典型的远程打击飞行器呈现乘波体结构。

收稿日期: 2020-01-02; 修回日期: 2020-02-23

作者简介: 王 皓(1995—), 男, 山东人, 硕士, 从事异型截面战斗部侵彻混凝土过程的弹道特性研究。E-mail: 438874976@qq.com。

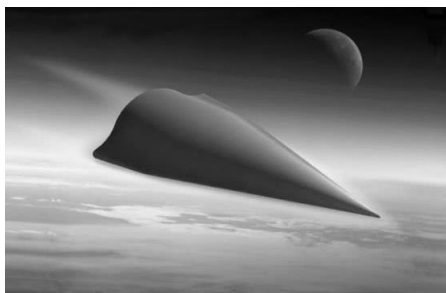


图 1 典型远程打击飞行器

与常规普通弹丸不同，该类打击飞行器任意一处的横向截面都不是圆形，而是由上下 2 个不同曲率的曲面组合而成的截面形状，不能达到打击并毁伤目标的战斗目标。现代战争中，由于现代探测技术发展迅速，若不能一次性摧毁目标则会丧失最有利摧毁敌方的机会。如果高速远程打击飞行器中搭载的战斗部的截面形状与飞行器的形状相似，则会更加有效利用打击飞行器中剩余空间，增加装药量，提高打击能力。如图 2 所示，近年来，我国学者也开始关注异型战斗部截面。

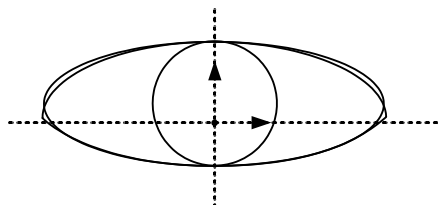


图 2 异型战斗部截面

2 类椭圆截面战斗部数值模拟

2.1 类椭圆截面战斗部截面特征参数定义

类椭圆截面战斗部的截面是非标准的椭圆，组成部分是上半部分椭圆和下半部分圆。类椭圆截面的主要特点是截面关于椭圆中心和圆心所在的直线对称。为减少需要确定的参数数量，以上半部分椭圆的长轴为 x 轴，短轴(也是椭圆中心和圆心所在直线)为 y 轴建立坐标系。椭圆的长半轴长度为 a ，椭圆的短半轴长度为 b ，圆上最低点到 x 轴的距离与椭圆短轴长度的比为 X 。由 a 、 b 、 X 便可以确定截面的整体特征，其一般截面形状如图 3 所示。

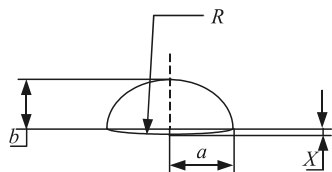


图 3 类椭圆截面战斗部截面参数

由 a 、 X 可以算得圆最低点到 x 轴的距离 a_0 为：

$$a_0 = aX \quad (1)$$

通过几何计算，利用 a_0 和 b 的数值能够计算得到下半部分圆形的半径

$$R^2 = b^2 + (R - a_0)^2 \quad (2)$$

简化后得

$$R = \frac{b^2 + a_0^2}{2a_0} \quad (3)$$

最终可以得到由 a 、 b 和 X 表示的截面，以及确定的 R 值。此时通过 3 项参数便可以确定唯一一个截面形状，且 $X=0$ 时为特殊情况，即截面为上半部分椭圆。

2.2 数值仿真模型及参数设置

考虑到对称性，采用 1/2 模型在 LS-DYNA 中建立数值仿真工程。弹丸模型参数如表 1 所示。

表 1 弹丸模型参数 mm

弹丸型号	长半径 a	短半径 b	截面特征数 X	弹丸度 l	弹头度 h
D1	15	12	0	180	58
D2	15	12	0.1	180	58
D3	15	12	0.5	180	58

混凝土靶板模型半径为 300 mm，深度为 1 000 mm 的圆柱。建模完成后利用 hypermesh 对弹丸和靶板进行网格划分，使侵彻结果具有可比性，划分网格时采用基本相同的尺寸，划分结果如图 4—6 所示。

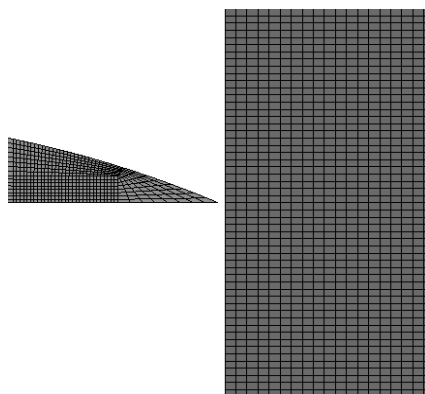


图 4 $X=0$ 时弹体与靶板的网格

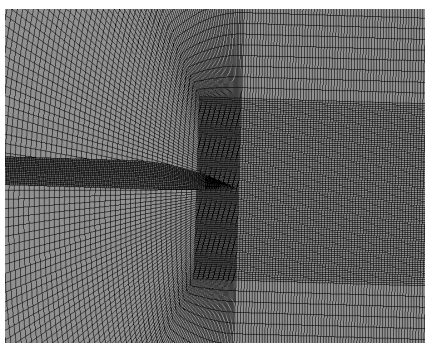


图 5 $X=0.1$ 时弹体与靶板的网格

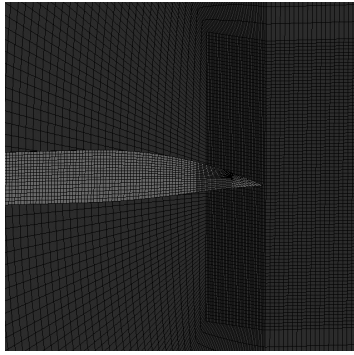


图 6 X=0.5 时弹体与靶板的网格

欧碧峰等^[8]通过对混凝土在碰撞条件下各种不同数值模拟模型比较发现，HJC 模型对于素混凝土侵彻问题较为适用，仿真过程中弹体材料参数和靶板材料参数取值如表 2、表 3 所示。

表 2 弹体材料刚性模型参数

$\rho_0/(g/cm^2)$	E/GPa	ν
7.85	200	0.26

表 3 靶板材料 HJC 模型参数

R_0	G	T	A	B	N
2.44	0.1486	4×10^{-5}	0.717	2.21	0.656
C	S_{max}	D_1	D_2	ϵ_{fmin}	K_1
0.007	7	0.04	1	0.01	0.85
K_2	K_3	P_{crush}	μ_{crush}	P_{lock}	μ_{lock}
-1.71	2.08	1.6×10^{-4}	1×10^{-3}	8×10^{-3}	0.1
EPSO	f_c	F_s			
1×10^{-6}	4.8×10^{-4}	0.7			

计算中通过添加弹体材料的 *MAT-ADD-EROSION 模型、侵蚀面接触及相应的最小试件步长等，控制失效网格的删除。设置初始速度 200 m/s，得到在特定的椭圆长径和短径长度确定时，X 值的变化对弹丸侵彻深度的影响。

2.3 数值仿真结果与分析

如图 7 所示，通过数值仿真得到不同截面特征系数的类椭圆截面弹丸在初速度 200 m/s 时，对混凝土靶板轴向侵彻深度结果的对比。

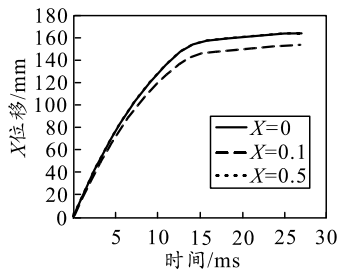


图 7 不同特征系数的弹丸在靶板 X 轴向侵彻深度

通过不同截面特征下沿靶板轴向侵彻深度可以看出：在相同的初速度下，类椭圆截面侵彻深度随着截面系数 X 的增大而降低，且侵彻深度的降低速

度小于截面系数的增加速度，即在截面系数 a、b 为定值时，随着截面特征系数 X 增大，弹丸沿靶板轴向侵彻深度缓慢降低。截面系数增大 4 倍时弹丸沿混凝土靶板轴向侵彻深度仅降低 12%。

同时，通过数值仿真结果发现，类椭圆截面战斗部在侵彻过程中除了有沿靶板 X 轴向的侵彻深度还有沿垂直于靶板轴向的 XOY 面的 Y 方向的位移。在不同截面特征系数下类椭圆截面弹丸 Y 方向的偏移深度结果如图 8 所示。

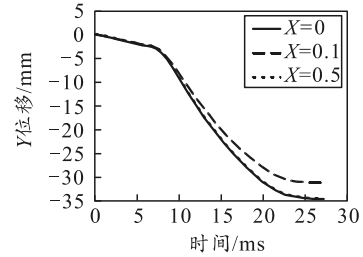


图 8 不同特征系数的弹丸在靶板 y 轴向侵彻深度

通过对非上下对称的类椭圆截面弹丸进行仿真可以发现：弹丸头部除了存在沿靶板轴向运动的位移之外，还存在沿垂直于靶板轴向的 XOY 面的 Y 方向的位移，将获得的仿真数据绘制成如图 8 所示，可以发现：随着特征系数的增加，弹丸沿 Y 向的位移减小，表明在 a、b 不变的前提下，截面特征系数 X 的增大会减小弹道在混凝土中的偏转角，减少侵彻过程中偏转所消耗的能量，有利于提升弹丸的侵彻能力。

通过数值仿真得到不同截面特征系数下，类椭圆截面战斗部在侵彻过程中阻力特性如图 9 所示。

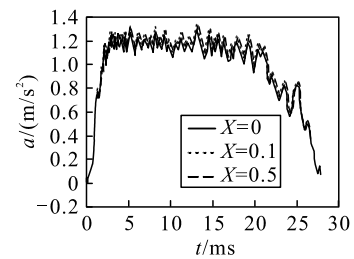


图 9 不同特征系数的弹丸力学特性

通过比较不同截面特征系数下弹丸侵彻的数值仿真结果可以看出：在侵彻过程中，随着弹丸截面系数的增加，侵彻所受的阻力增加，但是阻力增长幅度小于截面系数增长的幅度。分析图 9 可以看到：当截面系数由 0.1 增长到 0.5 时，弹丸的加速度仅从最高的 1.3 m/s² 增长到 1.4 m/s²，其增长率仅有 7.7%。

综合分析数值仿真的结果可以看出：在 a、b 2 个特征参数确定时，截面特征系数 X 的增加会降低

类椭圆截面弹丸的侵彻深度，最终获得的不同截面特征系数下弹丸的总侵彻深度如表 4。

表 4 不同截面特征系数弹丸侵彻深度

截面特征系数 X	0	0.1	0.5
侵彻深度/mm	172	165	152

从表中可以看出：在截面特征系数增加的情况下，类椭圆截面战斗部在相同初速度下总侵彻深度减小。

3 基于 Young 公式对数值模拟结果评价

3.1 Young 公式对于异型截面弹丸的适用性

Young 公式^[9]最早是由桑迪亚国家实验室 (SNL) 于 1967 年提出的侵彻公式，建立在 3 000 多次实验获得的数据库中，主要适用于弹丸侵彻土壤、岩石和混凝土的理论计算。现今大量使用的 young 公式如下：

$$H = \begin{cases} 0.0008KSN(M/A)^{0.7} \ln(1+2.15v_s^2 \times 10^{-4}), v_s < 61 \text{ m/s} \\ 0.000018KSN(M/A)^{0.7} (v_s - 30.5), v_s \geq 61 \text{ m/s} \end{cases} \quad (4)$$

式中： M 为弹丸质量； A 为弹体截面面积； v_s 为弹丸撞击靶板的速度； H 为弹丸侵彻深度； K 为缩尺效应系数，其公式为

$$K = \begin{cases} 0.46M^{0.15}, M < 182 \text{ kg} \\ 1.0, M \geq 182 \text{ kg} \end{cases} \quad (5)$$

式中 N 为弹头性能系数，对于卵形弹 N 的计算公式如下：

$$N = \begin{cases} 0.56 + 0.18L_n / d \\ 0.56 + 0.18(\text{CRH} - 0.25)^{0.5} \end{cases} \quad (6)$$

式中： L_n 为弹头长度； d 为弹体直径；CRH 为弹型系数。

Young 公式中 S 为阻力系数，其计算公式如下：

$$S = \begin{cases} 2.7(\sigma_c / Q)^{-0.3} \text{ (岩土)} \\ 0.085K_c(11 - P)(t_c h_c)^{-0.06} (35 / \sigma_c)^{0.3} \text{ (混凝土)} \end{cases} \quad (7)$$

式中： σ_c 为实验中混凝土的无侧限抗压强度； P 为混凝土中按体积计算的含钢百分率； Q 为岩石质量指标； t_c 为混凝土凝固时间，当凝固时间长于 1 a 时取 1； h_c 为目标厚度且以弹体直径为单位，当 $h_c > 6$ 时取 6；在没有更多的参数资料时 S 取 0.9； K_c 与混凝土材料有关，其公式为

$$K_c = \begin{cases} (F / W_1)^{0.3}, W_1 \leq F \\ 1, W_1 > F \end{cases} \quad (8)$$

其中： W_1 为靶板宽度与弹体直径的比值；钢筋混凝

土 $F=20$ ，素混凝土 $F=30$ 。

由王文杰等^[6-7]对于椭圆截面侵彻混凝土靶板的实验和仿真研究中可以发现：当弹丸的总长度和弹头长度相同时，椭圆截面战斗部侵彻深度与截面面积相同的头部为卵形的传统战斗部侵彻深度基本一致。通过计算来对其适用性进行验证。

传统弹丸采用材料 30CrMnSi₂A 高强度合金钢，密度为 7.85 g/cm³，混凝土靶板的模型参数与仿真保持一致。对于截面直径 24 mm、弹头长为 58 mm、弹丸总长 180 mm 的卵形头部的传统圆形截面战斗部，在 750 m/s 的初速度下侵彻 40 MPa 素混凝土的侵彻深度进行计算，得到 young 公式计算的侵彻深度为 574 mm，而文中相同截面积的椭圆形截面的战斗部在相同条件下的侵彻深度的实验结果分别为 596 和 555 mm。可以看出，理论计算结果与 2 次实验结果的偏差率分别为 3.69% 和 3.42%。

郭磊等^[10]通过实验与仿真的相互验证证明：在相同的初速度下，截面积相同、弹头和弹杆长度也相同的椭圆截面战斗部侵彻深度大约比传统圆形截面侵彻深度增加 10%。由此可以看出：在理论研究不完善，并且没有异型截面战斗部的侵彻经验公式的情况下，利用 Young 公式的等效面积法，从理论上验证异型截面战斗部侵彻深度中的结果差异约为 10%。在异型截面战斗部的研究初期，该差异率处于可接受的范围。

3.2 Young 公式对于数值仿真结果的验证

在弹丸采用材料 30CrMnSi₂A 高强度合金钢，其密度为 7.85 g/cm³，混凝土靶板的模型参数与仿真保持一致的情况下，初速度 200 m/s 的类椭圆截面战斗部侵彻深度的理论计算结果可以用等效截面法计算。

当 $X=0$ 时，类椭圆截面战斗部侵彻深度的计算可以等效为相同弹长和弹头长下的截面直径为 19 mm 的传统圆形弹丸侵彻相同参数的混凝土靶板的侵彻深度；当 $X=0.1$ 时，类椭圆截面战斗部侵彻深度的计算可以等效为相同弹长和弹头长下的截面直径为 20 mm 的传统圆形弹丸侵彻相同参数的混凝土靶板的侵彻深度；当 $X=0.5$ 时，类椭圆截面战斗部侵彻深度的计算可以等效为相同弹长和弹头长下的截面直径为 22 mm 的传统圆形弹丸侵彻相同参数的混凝土靶板的侵彻深度。利用 Young 公式可以得到理论情况下，不同 X 参数下类椭圆截面战斗部的理论侵彻深度如表 5。

表 5 类椭圆截面战斗部理论侵彻深度与模拟深度比较

截面特征系数 X	理论侵彻深度/mm	数值仿真深度/mm	数值仿真与理论计算的偏差率/%
0	153	172	+12.4
0.1	151	165	+9.3
0.5	142	152	+7.0

通过数值模拟与经验公式的验证可知：两者相互比较的偏差率在 15%以内，数值仿真结果在合理的区间，可以接受并且作为类椭圆截面战斗部设计的基础。

4 结论

笔者通过对类椭圆截面战斗部的数值模拟和经验公式的验证，获得类椭圆截面战斗部在低速时，侵彻混凝土的弹道规律：

- 1) 弹丸在侵彻过程中的纵向偏移量与截面特征系数相关，且随着截面特征系数的增大而减小；
- 2) 弹丸总侵彻深度与截面特征系数反向变动，即在相同的 a 、 b 值下，弹长相同且弹头部长度的弹丸截面特征系数 X 越大，其侵彻深度越小，但是侵彻深度降低的速度较慢。

参考文献：

[1] 杜忠华, 朱建生, 王贤治, 等. 异型侵彻体垂直侵彻半

(上接第 62 页)

参考文献：

[1] 潘宏禄, 李俊红, 沈清. 超燃进气道激波/湍流边界层干扰[J]. 推进技术, 2013, 34(9): 1172-1178.
 [2] 易仕和, 赵玉新, 何霖, 等. 超声速与超高速喷管设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 11-14.
 [3] 刘政崇. 高低速风动气动与结构设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 10-17.
 [4] 刘文芝, 张乃仁, 张春林, 等. 某型号固体火箭发动机喷管型面设计与数值计算[J]. 工程设计学报, 2006, 13(2): 99-103.
 [5] 姬晓辉, 武晓松, 季宗德. 最佳推力喷管型面设计[J]. 火箭技术, 1997(3): 10-13.
 [6] STERNIN L E. Calculating the thrust characteristics of nozzles from their outlet cross-section parameters[J]. Fluid Dynamics, 2003, 38(1): 153-163.
 [7] 成沉, 鲍福廷, 刘阳, 等. 基于响应面法的喉栓式喷管型面优化设计[J]. 固体火箭技术, 2014, 37(1): 47-51.
 [8] 方国尧, 王庆, 高山辉. 火箭发动机喷管内型面优化设计[J]. 推进技术, 1993, 14(3): 16-21.
 [9] YAKHOT V, ORZAG S A. Renormalization group

无限靶板的分析模型[J]. 兵工学报, 2009, 30(4): 403-407.
 [2] 高光发, 李永池, 刘卫国, 等. 长杆弹截面形状对垂直侵彻深度的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2011, 34(3): 5-8.
 [3] 高光发, 李永池, 罗春涛, 等. 混凝土靶高速侵彻的率相关相似律研究[J]. 火箭与制导学报, 2011, 31(3): 98-100.
 [4] 荣光, 薛晓中, 孙传杰, 等. 异型弹芯斜侵彻靶板的数值分析[J]. 弹道学报, 2009, 21(1): 5-8.
 [5] 荣光, 孙瑞胜, 薛晓中, 等. 两种非圆截面弹芯的侵彻性能研究[J]. 兵工学报, 2009, 30(4): 385-388.
 [6] 王文杰, 张先锋, 邓佳杰, 等. 椭圆截面弹体侵彻砂浆靶规律分析[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(1): 164-173.
 [7] 王文杰. 椭圆截面弹体侵彻混凝土靶过程研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018: 41-43.
 [8] 欧碧峰, 王君杰. 碰撞条件下常用混凝土模型比较[J]. 计算机辅助工程, 2008(1): 1-5.
 [9] 高世桥, 刘海鹏, 金磊, 等. 混凝土侵彻力学[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2012: 65-66.
 [10] 郭磊, 何勇, 潘绪超, 等. 非圆截面弹体侵彻混凝土靶试验与仿真研究[J/OL]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(3): 62-68.
 analysis of turbulence, I. ba-sic theory[J]. Journal of Scicentific Computing, 1986, 1(1): 3-51.
 [10] RAYMOND C, ALAA E, SUSAN C. Exhaust Nozzle Plume and shock Wave Interaction[R]. AIAA 2013-0012.
 [11] 郭昆, 唐海龙, 张坤. 爆震发动机扩张型引射喷管的非定常流动过程研究[J]. 推进技术, 2015, 36(12): 1781-1787.
 [12] 黄振宇, 徐文灿, 毛鸿羽. 喷管流场及其推力矢量的数值计算[J]. 兵工学报, 2000, 21(1): 31-34.
 [13] 王占学, 李志杰. 喷管气动参数对推力矢量影响的数值模拟[J]. 推进技术, 2008, 29(2): 187-193.
 [14] DANIEL C A, EPHRAIM G. Experimental Investigation of a Pulse Detonation Engine with a Two-Dimensional Ejector[R]. AIAA 2004-864.
 [15] 汪明生, 杨平. 双喉道推力矢量喷管的内流场特性研究[J]. 推进技术, 2008, 29(5): 566-572.
 [16] JIMENEZ A. Thrust vectoring foe advanced fighter aircraft, propulsion package[R]. AIAA 2001-3991.
 [17] 隆永胜, 胡振震, 袁竭, 等. 椭圆喷管设计与数值模拟[J]. 实验流体力学, 2015, 29(3): 80-86.
 [18] DEERE K A, BARRIER B L, FLAMM J D. A computational study of a new dual throat fluidic thrust vectoring nozzle concept[R]. AIAA 2005-3502.